(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

УДК: 620.98 10.70769/3030-3214.SRT.3.2.2025.6

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАССИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ И ИХ ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ





Авезова Нилуфар Раббанакуловна
Доктор технических наук, Ферганский политехнический институт, Фергана, Узбекистан
E-mail: avezovanr@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4298-1041

Дехконова Махлиёхон Хусниддин кизи
Младший научный сотрудник, Национальный научно-исследовательский институт возобновляемых источников энергии, Ташкент, Узбекистан
E-mail: dxmaxliyo@gmail.com

Аннотация. *В работе проанализированы современные подходы к математическому моделированию пассивных систем солнечного отопления с использованием энергоэффективных оконных блоков. Рассмотрены эмпирические, аналитические и численные методы (включая метод конечных элементов и многослойное моделирование теплопередачи) с учётом климатических особенностей, что позволяет оптимизировать конструктивные решения и режимы эксплуатации пассивных систем солнечного отопления. Особое внимание уделено внедрению инновационных энергоактивных оконных блоков (многослойные стеклопакеты с инертным газом, низкоэмиссионным покрытием, фазопереходными материалами) для повышения энергоэффективности зданий. На основе проведённого анализа разработаны рекомендации по интеграции ПССО в энергоэффективные проекты и выделены ключевые факторы адаптации международного опыта к региональным климатическим условиям. Полученные результаты подтверждают значительный потенциал пассивных систем солнечного отопления в снижении энергопотребления и улучшении экологической устойчивости строительной отрасли.*
Ключевые слова: *пассивные системы солнечного отопления, энергоэффективные оконные блоки, математическое моделирование, теплопередача, фазопереходные материалы, климатическая адаптация, энергоэффективность зданий.*

ZAMONAVIY PASSIV QUYOSH ISITISH TIZIMLARINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH USULLARI VA ULARNING AMALIY TATBIQI

Avezova Nilufar Rabbanaqulovna
Texnika fanlari doktori, Farg'ona politexnika instituti, Farg'ona, O'zbekiston

Dexkonova Maxliyoxon Xusniddin qizi
Kichik ilmiy xodim, Qayta tiklanuvchi energiya manbalari milliy ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent, O'zbekiston

Annotatsiya. *Ushbu ishda energiya tejamkor oynali bloklardan foydalangan holda passiv quyosh isitish tizimlarini matematik modellashtirishning zamonaviy yondashuvlari tahlil qilingan. Empirik, analitik va sonli usullar (jumladan, oxirgi elementlar usuli hamda ko'p qatlamli issiqlik uzatish modellashtirish) iqlim xususiyatlarini hisobga olgan holda ko'rib chiqilgan bo'lib, bu passiv quyosh isitish tizimlarining tuzilmasi va ishlash tartibini mukammallashtirish imkonini beradi. Alohida e'tibor bino energiya samaradorligini oshirish maqsadida innovatsion, energiya faol oynali bloklarni (inert gaz bilan to'ldiril-*

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

gan ko'p qatlamli shisha paketlar, past emissiyali qoplamalar, faza o'tish materiallari) joriy etishga qaratilgan. O'tkazilgan tahlillar natijasida passiv quyosh isitish tizimlarini energiya samarador loyihalarga integratsiya qilish bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqilgan, shuningdek, xalqaro tajribani mintaqaviy iqlim sharoitlariga moslashtirishning asosiy omillari ajratib ko'rsatilgan. Olingan natijalar passiv quyosh isitish tizimlarining energiya iste'molini kamaytirish va qurilish sohasi ekologik barqarorligini oshirishdagi salmoqli salohiyatini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: *Passiv quyosh isitish tizimlari, energiya tejamkor oyna bloklari, matematik modellashtirish, issiqlik uzatish, faza o'tuvchi materiallar, iqlimga moslashuv, binolarning energiya samaradorligi.*

MODERN METHODS OF MATHEMATICAL MODELING OF PASSIVE SOLAR HEATING SYSTEMS AND THEIR PRACTICAL IMPLEMENTATION

Avezova Nilufar Rabbanakulovna
Doctor of Technical Sciences, Fergana Polytechnic Institute, Fergana, Uzbekistan

Dexkonova Makhliyokhon Khusniddin kizi
Junior Research Fellow, National Research Institute of Renewable Energy Sources, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. *In this work, modern approaches to mathematical modeling of passive solar heating systems using energy-saving glass blocks are analyzed. Empirical, analytical, and numerical methods (including the finite element method and multilayer heat transfer modeling) are considered, taking into account climatic features, which will allow improving the structure and operating modes of passive solar heating systems. Special attention is paid to the introduction of innovative, energy-active glass blocks (multilayer glass packages filled with inert gas, low-emission coatings, phase transition materials) in order to increase the energy efficiency of the building. As a result of the analysis, recommendations were developed for the integration of passive solar heating systems into energy-efficient projects, and the main factors for adapting international experience to regional climatic conditions were identified. The obtained results confirm the significant potential of passive solar heating systems in reducing energy consumption and increasing the environmental sustainability of the construction industry.*

Keywords: *Passive solar heating systems, energy-saving glass blocks, mathematical modeling, heat transfer, phase-shifting materials, climate adaptation, energy efficiency of buildings.*

Введение. В условиях глобального изменения климата и истощения традиционных энергоресурсов строительный сектор предъявляет повышенные требования к энергоэффективности зданий. Известно, что на эксплуатацию зданий расходуется до 20–40% суммарной вырабатываемой энергии, при этом на их долю приходится около 30% выбросов парниковых газов

Одним из перспективных подходов к снижению этого негативного влияния является концепция пассивного здания – сооружения, использующего архитектурно-конструктивные решения для поддержания комфортного микроклимата с минимальным потреблением внешних источников энергии. Важнейшей составляющей таких решений выступают пассивные системы солнечного отопления (ПССО), которые аккумулируют поступающую солнечную энергию (СЭ) для обогрева помещения без применения активных механических устройств. Благодаря простоте и относительной дешевизне пассивные методы солнечного обогрева получили широкое распространение в мировой практике архитектуры устойчивого развития

Однако пассивные системы имеют и ограничения: например, зависимость эффективности от ориентации здания и параметров климата, а также потенциальный световой и тепловой дискомфорт из-за затруднённого регулирования поступающей солнечной энергии. Эти факторы снижают популярность прямого солнечного отопления в районах с резко континентальным климатом (характерным для большей части территории Узбекистана).

Для преодоления указанных недостатков исследователи предложили различные стратегические решения. В этом свете проведёны ряд

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

научных работ по оптимизации теплотехнических параметров пассивных солнечных систем, рациональному использованию светопрозрачных ограждений и оценке энергоэкономической эффективности подобных систем.

В частности, исследования, проводимые в Узбекистане, показали, что для условий резко-континентального климата требуются специальные меры, такие как регулирование доли остекления, использование солнцезащитных устройств и интеграция теплоаккумулирующих элементов, чтобы нивелировать суточные и сезонные колебания температуры. Так, в работах школы Р. Авезова реализована оптимизация параметров пассивных систем именно с учётом экстремальных перепадов температур и высокой солнечной инсоляции в регионе [1]. Научная значимость этих исследований заключается в том, что они адаптируют общие принципы пассивного проектирования к конкретным условиям Средней Азии, обогащая мировую копилку знаний практическим опытом применения пассивных стратегий в новом климатическом контексте.

Отдельно следует отметить значительный вклад ученых школы профессора Р. Авезова по разработке эффективных методов адаптации пассивного солнечного отопления к условиям резко континентального климата. Исследователями предложено инновационное решение – применение энергоактивного оконного блока (ЭОБ) с трёхслойным светопрозрачным ограждением, позволяющее повысить эффективность прямого солнечного обогрева здания до 50% и более.

Кроме того, под руководством Р. Р. Авезова выполнено множество расчетных и экспериментальных исследований ПССО, результаты которых легли в основу рекомендаций для различных климатических зон регионов республики. Таким образом, объединение опыта мировых исследований с результатами школы профессора обеспечивает всесторонний научный обзор проблемы и подчёркивает ценность достижений отечественной науки в данной области.

В связи с эим настоящая статья фокусируется на анализе различных подходов к моделированию ПССО, включая эмпирические, аналитические и численные методы для определения их энергетических, экономических и экологических показателей.

Также представлен краткий обзор стратегий архитектурного дизайна, применяемых для пассивного солнечного отопления, обсуждается важность подготовки точных исходных данных для расчетов, раскрывается роль моделирования ПССО в разработке биоклиматических карт и анализируется значимость применения энергоактивных оконных блоков. Усиленное внимание уделено научной аргументации и практической значимости результатов, полученных отечественными исследователями.

Обзор литературы по моделирование энергопотребления зданий Современные тенденции в строительстве направлены на повышение энергоэффективности зданий (ЭЗ) и сокращение углеродного следа. Одним из наиболее перспективных решений является применение ПССО, которые обеспечивают, обогрев помещений за счёт аккумулирования СЭ. Важным элементом таких систем являются ЭОБ, способные значительно снижать тепловые потери и улучшать теплоизоляцию зданий.

Процесс расчёта теплотехнических параметров ПССО представляет собой сложную задачу, требующую учёта динамики изменения внешних факторов, таких как солнечная радиация (СР), температура окружающей среды и ветровые нагрузки. Разработка точных математических моделей является ключевым этапом оптимизации систем и повышения их эффективности, позволяя прогнозировать поведение системы в течение суток и сезонов.

Как известно, процесс расчёта теплотехнических параметров пассивных систем является сложным, поскольку требует учитывать динамику изменения показателей внешних факторов в зависимости от времени суток и сезона. При этом основное внимание уделяется двум задачам: первой – моделированию граничных условий с использованием долгосрочных климатических данных, и второй – анализу теплопередачи в конструкциях здания [2–5].

В то же время моделирование ПССО требует комплексного подхода, включающего как учёт нестационарных процессов, так и привлечение экспериментальных данных для вали-

дации, поскольку эффективность таких систем зависит от географического положения дома (широта, климатические условия), архитектурных решений (ориентация, площадь остекления, тепловая масса) и качества теплоизоляции здания.

В работах авторов [6–8] результаты моделирования и эксперименты показали, что для оптимальной интеграции пассивных систем в конструкцию дома необходимо использование стеклопакетов с низким коэффициентом теплопередачи, увеличение площади остекления на южной стороне и добавление тепловой массы (например, бетонных или кирпичных стен) для аккумуляции тепла.

Для расчёта объектов, использующих ПССО, разработаны различные подходы, которые условно можно классифицировать на три основные категории [9–11]:

Простейшие методы расчёта, где солнечное излучение (СИ), поступающее на вертикальные или наклонные поверхности, умножается на эмпирические коэффициенты для оценки количества полезного теплоты. Например, результаты работ Krivoshein и соавт. [9] по моделированию СР для горизонтальных и наклонных поверхностей в условиях Якутска показывают значительное сезонное влияние.

Расчёт температурного режима остеклённой коллекторно-аккумулирующей стенки при фиксированной температуре внутри помещения (без учёта связи с остальной частью здания). В рамках этого направления Misiopecki и др. [10] определили оптимальное положение энергоэффективных окон для снижения тепловых потерь, что показало возможность повышения энергоэффективности до 15% в зависимости от ориентации.

Детализированное математическое моделирование нестационарных процессов теплопередачи, включая тепловые модели, а также модели потоков воздуха, пористости и турбулентности в зданиях. Например, в работах Pilipenko и Petrov [11] рассмотрены вопросы нестационарного теплообмена: такая система моделирования учитывает динамические изменения тепловых характеристик и обеспечивает увеличение точности расчётов на 10–15% по сравнению с традиционными методами.

Отметим, что первые два метода расчёта являются весьма приближенными и не отражают существа процессов распределения тепла в системе в целом. В случае же третьего метода стоит упомянуть, что система дифференциальных уравнений весьма сложна, хотя её решение с помощью современной вычислительной техники принципиально возможно. В конечном итоге, используя такие модели, можно получать как текущие, так и интегральные значения параметров рассматриваемых систем, однако сложность этих моделей делает их применение в проектной практике затруднительным.

На сегодняшний день в исследованиях наибольший интерес представляют не текущие значения параметров, а их интегральные показатели за месяц или отопительный период, поскольку именно они определяют энергетическую эффективность системы и технико-экономические показатели ПССО [6]. При этом важнейшим интегральным показателем является коэффициент замещения нагрузки, представляющий отношение полезного тепла, выработанного ПССО за определённый период, к общей тепловой нагрузке здания за тот же период. Этот коэффициент является ключевым для оценки энергетической эффективности и экономической рентабельности внедрения ПССО, а также целесообразности их применения. Текущие значения параметров имеют меньшее значение, так как дублирующая система отопления, основанная на традиционных источниках энергии, должна быть рассчитана на покрытие максимальной отопительной нагрузки в любом случае [8].

В этой связи практический интерес представляет рассмотрение результатов исследований, посвящённых моделированию и оптимизации энергопотребления зданий с учётом применённых в них инструментов оценки и методов.

Инструменты оценки и методы. В обзорном исследовании Tian и др. [12] проанализировано более 100 работ по имитационному моделированию и оптимизации энергопотребления зданий в пассивном проектировании, оценены преимущества программных инструментов, таких как EnergyPlus, eQUEST,

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

DesignBuilder и др. Авторы анализируют существующие методы, выявляют преимущества и препятствия и на этой основе предлагают внедрение BESO (Building Energy Simulation and Optimization) для более широкого применения в архитектурной практике, что позволяет повысить энергоэффективность зданий за счёт оптимизации пассивных элементов (ориентация, теплоизоляция и остекление) и снизить их эксплуатационные расходы до 25% в год, сократив энергопотребление на 20–40%. Применение точных моделей энергопотребления в пассивном проектировании уменьшает тепловые потери зданий на 15–30%.

Авторы отмечают, что моделирование и оптимизация энергопотребления с помощью BESO является ключевым инструментом в пассивном строительстве, обеспечивая значительное сокращение энергозатрат и повышение комфорта жилья, однако его внедрение требует преодоления образовательных и технических барьеров. Использование симуляционных инструментов для выбора оптимального сочетания материалов и конструктивных элементов обеспечивает повышение ЭЗ на 10–20%. В развитых странах около 30% новых проектов активно используют BESO в процессе проектирования. В странах с менее развитой инфраструктурой показатели внедрения ниже — около 10%, что обусловлено недостаточной подготовкой специалистов.

В работе авторов [13] показано, что помимо длительного времени расчётов существенным препятствием для внедрения BESO является отсутствие стандартного метода.

Как известно, важным этапом анализа энергетической эффективности зданий является идентификация ключевых проблем, таких как многомодальность и дискретность оптимизационных задач в строительстве. Это диктует необходимость совершенствования алгоритмов оптимизации для решения сложных задач и разработки более эффективных методов поиска и аппроксимации при оптимизации зданий. В работе Crawley и соавт. [14], посвящённой инструменту EnergyPlus как новому поколению программ для моделирования энергопотребления зданий, показаны возможности программы, включая интеграцию тепловых зон, систем HVAC и возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что позволяет учитывать сложные взаимодействия между различными системами здания.

В работе [15] показаны возможности использования инструмента eQUEST для моделирования энергопотребления зданий. Данная программа позволяет выполнять предварительные оценки энергопотребления на этапе проектирования и быстро и эффективно оценивать энергетическую эффективность зданий. Отметим, что DesignBuilder является комплексным инструментом для моделирования энергопотребления, освещения, вентиляции и выбросов CO_2 для анализа производительности зданий на всех этапах проектирования. В работе [16] представлены результаты интеграции DesignBuilder с EnergyPlus для проведения детальных симуляций, что доказало широкий спектр возможностей DesignBuilder для анализа различных аспектов производительности зданий.

Известно, что скоростью теплообмена стен в зданиях можно управлять, изменяя их толщину или увеличивая толщину слоя изоляции. Однако этот подход невозможен в случае стеклянных компонентов окон. В связи с чем представляет практический интерес рассмотреть результаты исследований по моделированию и сравнению теоретических решений с экспериментальными данными ограждающих конструкций (ОК) для оценки возможности повышения ЭЗ в целом.

В работе [17] анализируется теплопередача через оконные конструкции для повышения энергоэффективности. Автор использует одномерные математические модели для определения распределения тепла в многослойных стенах. Для точного моделирования и сравнения теоретических решений с экспериментальными данными использовалась программа COMSOL Multiphysics, что подтвердило правильность предложенной модели. При этом увеличение числа стёкол в окне может снизить теплопередачу лишь до определённого уровня, но приводит к значительному увеличению общей толщины окна, его веса и стоимости при одновременном снижении светопропускания, утверждают авторы работы [18]. Рассмотрены

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

способы снижения теплопотерь через окна, которые имеют наименьшее сопротивление теплопередаче. Проанализированы элементы ОК, такие как стеклопакеты, рама, фурнитура и монтажные швы, с акцентом на их влияние на теплоизоляционные свойства. Для улучшения теплоизоляции рекомендовано использовать ПВХ-рамы, молекулярные осушители, энергосберегающие стёкла и трёхкамерные стеклопакеты с аргоном. Также предлагаются решения для улучшения герметичности, использования экологичных материалов и инновационных систем вентиляции и уплотнения с целью сокращения теплопотерь. Таким образом, окна представляют собой наиболее уязвимые части ОК здания и характеризуются самой низкой энергоэффективностью среди всех элементов здания, генерируя до 60% общих теплопотерь через ограждения [19]. В этом контексте важно оценить влияние всех факторов на теплопередачу через окно — теплопроводности, конвекции в газовом слое между стёклами и теплового излучения, которые являются основными составляющими теплопотерь.

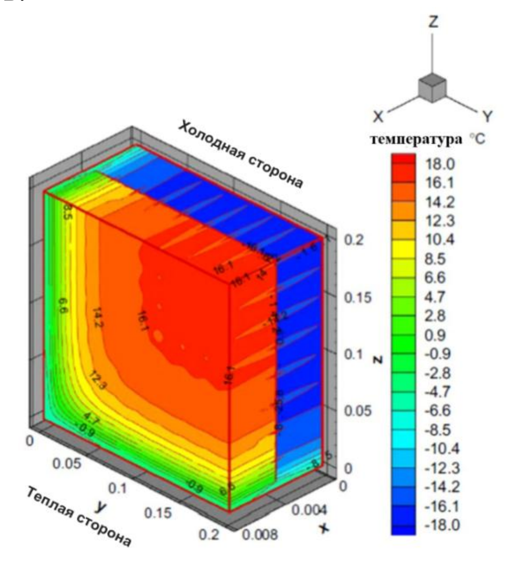


Рис.1. Прогнозируемые 3D-изотермы вакуумного остекления без рамы [19].

Результаты применения ЭОБ в ПССО. Результаты исследований показывают, что применение энергоэффективных светопрозрачных ограждений может сократить расходы на отопление на 10–20% ежегодно в холодных регионах, где необходимо использовать усиленные рамные профили, способные выдерживать экстремальные перепады температур (до –50°C).



Рис.2. Принцип работы низкоэмиссиионного тепла [20].

Таким образом, одним из подходов к повышению энергоэффективности современных зданий и снижения их зависимости от традиционных источников энергии является применение ПССО с ЭОБ [21], поскольку такие оконные системы обеспечивают не только естественное освещение и теплоизоляцию, но и аккумулирование солнечной энергии для обогрева помещений.

Как указано выше, математическое моделирование тепловых режимов в ПССО позволяет точно прогнозировать тепловые процессы, учитывая нестационарные изменения внешних условий, такие как СИ, температура окружающей среды и теплопередача через ОК, что в свою очередь позволяет оптимизировать конструктивные решения и эксплуатационные параметры систем, повысить их энергоэффективность и уменьшить затраты на отопление и охлаждение без нарушения теплового комфорта. Учитывая вышесказанное, рассмотрены подходы и методы по моделированию основных физических процессов в зданиях с ПССО и ЭОБ, что в целом способствует повышению их энергоэффективности.

Большой интерес в данном контексте представляют результаты исследования А.М. Павленко и др. [22] по оценке численных методов прогнозирования энергоэффективности окон. В целях такой оценки проанализировано

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

более 100 исследований по типам ЭОБ, математической формулировке и численному методу расчёта основных показателей под воздействием солнечной и тепловой радиации. Цель анализа заключалась в оценке теплового потока и распределения температуры по остеклённым поверхностям и в проверке точности традиционных подходов к определению теплопотерь через ОК. Результаты были получены с использованием метода измерения теплового потока, описанного в международном стандарте ISO 9869-1:2014. Выявлено, что неравномерность плотности теплового потока может достигать 60%, что приводит к существенным ошибкам при использовании традиционных методов расчёта теплопотерь.

Критический анализ исследований, проведённый авторами, показал, что моделирование процессов теплообмена через окна предполагает принятие ряда допущений, упрощающих решение определяющих уравнений, что приводит к расхождению расчётных и экспериментальных данных. Существенной проблемой является тот факт, что полученные данные сильно различаются в разных частях окна. Например, конвекция может иметь место в середине окна, но ближе к краям или в нижней его части конвекция может отсутствовать. Как следствие, плотности тепловых потоков на поверхности окна различны, и распределение температуры, рассчитанное некоторыми моделями, может быть достаточно точным лишь для части окна. Также стоит отметить, что использование усреднённых значений для локальных плотностей теплового потока по всей поверхности окна приводит к значительной погрешности [22].

Так как методы конечных элементов и конечных разностей обеспечивают высокую точность при моделировании теплопередачи через оконные конструкции, авторы рекомендуют использовать комбинированный подход, сочетающий численные методы с экспериментальными данными, для повышения точности прогнозирования.

В работе Jean-Michel Dussault и др. [23], посвящённой снижению энергопотребления зданий за счёт использования «умных» оконных систем с регулируемым светопропусканием, показано, что такие системы могут снизить годовое энергопотребление на отопление и охлаждение до 30%. С помощью численного моделирования определены оптимальные параметры управления светопропусканием для различных климатических условий.

Интеграция «умных» оконных систем в фасады зданий является перспективным направлением повышения их энергоэффективности, особенно в регионах с выраженными сезонными колебаниями температуры. В указанной работе применены две модели для оценки эффективности интеллектуальных окон (технология основана на поглощающем слое) с целью снижения общего годового энергопотребления зданий. Выявлено, что внедрение этой технологии остекления значительно повышает ЭЗ: энергозатраты на освещение, отопление и охлаждение могут быть снижены примерно на 20% зимой и более чем на 40% в тёплое время года.

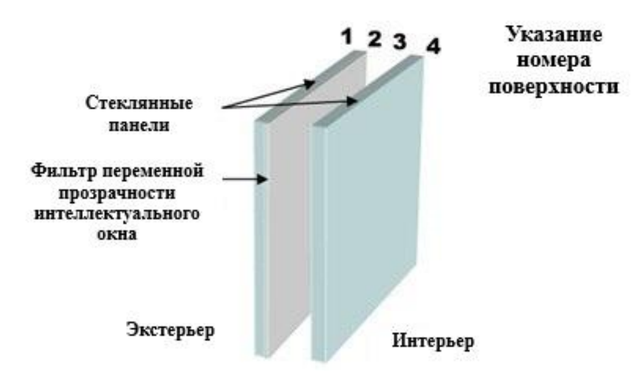


Рис.3. Умное окно с двойным остеклением [23].

В работе В.А. Земцова и Е.В. Гагариной [24] разработан и предложен расчётно-экспериментальный метод определения общего коэффициента пропускания света оконных блоков, позволяющий учитывать конструктивные особенности окон и их ориентацию относительно сторон света. Верификация метода на реальных образцах оконных конструкций показала высокую точность результатов.

В работе Nourozi и др. [25] представлена модель теплопередачи для «энергоактивных» окон, способных улавливать и повторно использовать тепловые потери внутри здания. Моделирование показало, что такие окна могут снизить общие тепловые потери здания на 15–20%.

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

Определены оптимальные материалы и конструкции для максимальной эффективности теплового обмена. Проведённый анализ чувствительности параметров для оценки теплотехнических характеристик окон показал, что ЭОБ потенциально могут снизить потребление тепловой энергии примерно на 2,2 Вт/м² площади пола и 1,3 Вт/м² площади этажа при температурах наружного воздуха –20°C и –5°C соответственно для зданий с отношением площади окон к площади пола 10%. Выявлено, что число Нуссельта для параллельных пластин с асимметричной температурой поверхности примерно в 1,9 раза ниже, чем для пластин с симметричной температурой поверхности; данный факт следует учитывать при проектировании теплообменников с различной температурой поверхностей. Также показано, что наивысшая тепловая эффективность ЭОБ достигается, когда температура подаваемого внутрь блока воздуха равна или выше комнатной [25].

В исследовании Basok и др. [26] проведено численное моделирование теплопередачи через трёхкамерное окно с учётом различных типов заполнения межстекольных пространств (воздух, аргон, криптон). Установлено, что использование криптона в качестве заполнителя снижает коэффициент теплопередачи окна на 30% по сравнению с воздухом. Определены оптимальные расстояния между стёклами для минимизации теплопотерь.

Трёхкамерные окна с инертными газами в межстекольных пространствах значительно повышают тепловую эффективность оконных систем, что особенно актуально для регионов с холодным климатом. Выявлено, что центральное остекление в трёхкамерном окне способствует уменьшению конвективной тепло-передачи через газовую среду за счёт снижения скорости свободно-конвективных потоков в отсеках. Однако центральное стекло вносит более существенный вклад в снижение радиа-ционной теплопередачи, выступая в качестве экрана; в результате тепловое сопротивление трёхкамерного окна, заполненного воздухом, оказалось в 1,7 раза больше, чем у двух-камерного окна той же общей толщины.

В комбинированном экспериментально-численном исследовании Kamal A.R. и др. [27] проведено экспериментальное исследование вентиляционных окон с отражающей плёнкой для оценки их тепловых характеристик. Установлено, что такие окна снижают тепловую нагрузку на помещение на 25–35% в условиях высокой СР.

Результаты показали, что снижение температуры увеличивается с увеличением зазора между стёклами, причём расстояние более 0,03 м оказывает незначительное влияние. Эксперименты подтвердили, что вентилируемое окно с плёнкой более эффективно и может снизить энергопотребление почти на 57%, поэтому его можно рекомендовать для жаркого климата.

Результаты исследований отечественных ученых. В республике развитие теории и опыт расчёта тепловой эффективности многослойных светопрозрачных ограждений (СПО) зданий берёт начало с исследований под руководством проф. Р. Р. Авезова. Им впервые разработана упрощённая методика определения эффективных коэффициентов отражения, поглощения и пропускания прямого солнечного излучения для сложных СПО, состоящих из двух и более слоёв с различными оптическими свойствами, разделённых воздушными прослойками, с учётом многократных отражений между слоями. В частности, предложена методика расчёта коэффициентов для трёхслойного СПО, учитывающая многократное отражение падающего излучения на границах каждого слоя [28–30].

$$\tau_{эфф_{(3)}} = \frac{\tau_{эфф_{(1)}}\tau_{эфф_{(2)}}\tau_{эфф_{(3)}}}{\left(1-\rho_{эфф_{(1)}}\rho_{эфф_{(2)}}\right)\left(1-\rho_{эфф_{(1)}}\rho_{эфф_{(3)}}\right)-\rho_{эфф_{(2)}}\rho_{эфф_{(3)}}\tau^2_{эфф_{(1)}}} \quad (1)$$

где: цифры в индексах эффективных коэффициентов отражения $\rho_{эфф}$, поглощения $\alpha_{эфф}$ и пропускания $\tau_{эфф}$ прямого СИ сложных СПО указаны порядок последовательности каждого из слоев, а цифры в индексе в скобках (1,2,3) указываются эти же величины одно-, двух- и трехслойного ограждений соответственно. Примененный **графо-аналитический метод** Авезовым основывается на решении дифференциальных уравнений теплопередачи в нестационарных условиях.

Далее на основе предложенной методики выполнен ряд исследований по моделированию тепловых процессов в ПССО. Использованные

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

численные методы расчёта позволили учесть динамические изменения СР и температурных условий и получить следующие результаты [31–35]:

- разработана математическая модель стационарного теплового режима помещения с инсоляционной пассивной системой отопления (ИПСО) для определения месячного хода среднесуточных значений температуры его воздушной среды и коэффициента замещения топлива системой по месяцам отопительного сезона;
- на основе анализа суточного хода изменения температуры воздушной среды помещения с ИПСО при различных значениях отношения (вероятно, площади остекления к объёму или другой параметр – не указан) определены рациональные периоды использования краткосрочных аккумуляторов теплоты для хранения дневного излишка солнечного тепла;
- смоделирован процесс суточной естественной аккумуляции тепла во внутренних слоях ограждений помещения с ИПСО, на основе чего определено значение коэффициента естественной аккумуляции во внутренних слоях ограждений помещения из традиционных материалов;
- предложена методика определения необходимой теплоёмкости краткосрочного (суточного) аккумулятора тепла дневного излишка солнечного тепла в ИПСО с трёхслойными ЭОБ;
- обоснована целесообразность применения в качестве теплоаккумулирующего материала в краткосрочных аккумуляторах теплоты ИПСО фазопереходных материалов (ФПМ) с температурой плавления 18–22°C, определена их удельная масса (отнесённая к единице площади СПО) и рекомендовано рациональное место размещения внутри отапливаемого помещения.

Полученные существенные научно-практические результаты в области разработки и усовершенствования ПССО диктуют необходимость дальнейших углублённых исследований по применению новых технологий и инженерных подходов для улучшения качества проектирования и повышения энергоэффективности зданий с ПССО, учитывая как технические, так и климатические аспекты. В частности:

- *разработка фазопереходных аккумуляторов тепла:* перспективным направлением является использование фазопереходных материалов в качестве краткосрочных аккумуляторов тепла в ПССО. Эти материалы позволяют повысить энергоэффективность, аккумулируя СЭ в течение дня и высвобождая её ночью;
- *оптимизация размеров и состава стеклопакетов:* рекомендуется дальнейшее исследование оптимальной толщины и состава стеклопакетов с учётом местных климатических условий. Например, увеличение толщины воздушных прослоек до 16 мм приводит к повышению теплового сопротивления, что особенно важно для холодных регионов.

В этом контексте необходимо отметить значимые результаты, полученные профессором К.А. Самиевым. В работах [36–38] им разработан и **применён метод динамического моделирования** для изучения тепловых характеристик трёх типов ПССО: «прямое облучение», «массивная стена» (стена Тромба) и «теплица» для климатических условий Республики Узбекистан. С помощью моделирования была оценена эффективность использования стены Тромба в четырёхкомнатном доме с ЭОБ. В результате исследования установлено, что внедрение стены Тромба позволило снизить потребление тепла на 36,5% (с 211,6 до 134,34 кВт·ч/м²·год). Также показано, что применение фазопереходного аккумулятора тепла в стене Тромба дополнительно сократило потребление тепла на 10%, снизив его до 119,4 кВт·ч/м²·год (суммарное снижение на 56,6% по сравнению с исходным значением). В исследовании К.А. Самиева также сопоставлены тепловые потери через различные ОК, предназначенные для ПССО, путём проведения теоретических и экспериментальных исследований (рис. 4).

Разработанная математическая модель позволяет определить суточные колебания температуры элементов ПССО с использованием стены Тромба, что даёт возможность оценить потенциал энергосбережения при её применении на территории страны.

Как отмечалось выше, стратегии проектирования пассивных зданий основываются на

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

климатических показателях местности, поскольку именно разница между фактическими климатическими условиями и комфортными условиями эксплуатации, а также причины этой разницы обуславливают необходимость принятия соответствующих мер при проектировании здания. Это также диктует необходимость подготовки наиболее точных исходных данных.

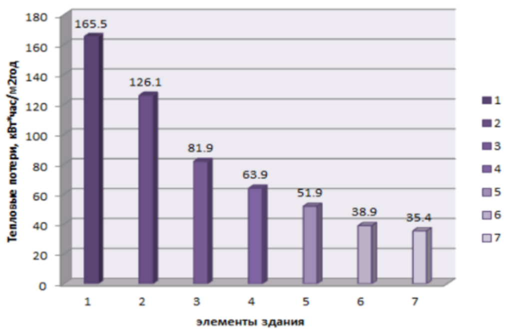


Рис.4. Тепловые потери через элементы здания:

1- окна (R = 0.47 м2°С/Вт); 2- окна с изоляцией; 3- окна с водяными аккумуляторами теплоты; 4-окна с фазопереходными аккумулятора теплоты; 5- стена с первым уровнем теплозащиты; 6- стена с вторым уровнем теплозащиты; 7- стена с третьим уровнем теплозащиты [38].

Для масштабного внедрения ПССО в республике и определения оптимальных режимов их применения проф. Н.Р. Авезовой и др. [39] рассчитаны фактические значения градусо-суток отопительного и охладительного периодов (HDD и CDD) для территории Узбекистана на основе методики ASHRAE с учётом выявленных значений минимальной, максимальной и средней суточной температуры наружного воздуха. В расчётах использованы последние архивы климатических данных за период 2005–2020 гг., полученные из 42 открытых источников метеостанций, пригодных для научных исследований. В ходе этих исследований выявлены различия в показателях HDD и CDD по сравнению с данными других авторов, например М. Кенисарина и др. [40], где для расчётов брались данные действующих нормативных документов [41]. Так, согласно расчётам Авезовой и соавторов, при комфортной температуре 18°С максимальное значение HDD составляет 3631°С·сут, тогда как в исследовании М. Кенисарина [40] этот показатель не превышал 3550°С·сут. Минимальное значение HDD в расчётах Авезовой и др. составило 1517°С·сут, тогда как в [39] оно было выше – 1802°С·сут. В случае CDD также наблюдались различия: при базовой температуре 20°С расчётное значение CDD для северных регионов (Каракалпакстан) по данным Авезовой и др. составило 776°С·сут, что значительно выше данных [39] (412°С·сут), а для более тёплых регионов (Сурхандарья) расчёт Авезовой и др. дал 1296°С·сут, тогда как в [39] это значение не превышало 947°С·сут. В данном исследовании авторами впервые выявлено влияние перепада высот на CDD и показаны различия в значениях CDD на более высоких точках страны над уровнем моря, таких как Чимган (1800 м), Пскем (1214 м) и Камчик (2145 м).

Далее исследователем Э. Рахимовым [42] применена **новая методика моделирования, использующая методы цифровизации и картографирования** показателей теплопотерь через 1 м² ЭОБ на основе средних максимальных и минимальных температур за 2000–2023 гг., представленных в виде цифровых карт.

На рис. 5 показаны результаты оценки теплопотерь и теплопоступлений через трёхслойное ЭОБ в различных климатических условиях Узбекистана за январь и июль (соответственно рис. 6а, 6б), полученные из среднечасовых данных базы ERA5-Land с разрешением 0,1°×0,1° (данные обновляются ежемесячно с задержкой около трёх месяцев от текущей даты), а также из среднемноголетних максимальных и минимальных температур. Полученная карта даёт важные выводы для оценки эффективности ЭОБ в течение года. В ходе исследования получены важные данные о теплопотерях и теплопоступлениях через ЭОБ в климатических условиях Узбекистана [43].

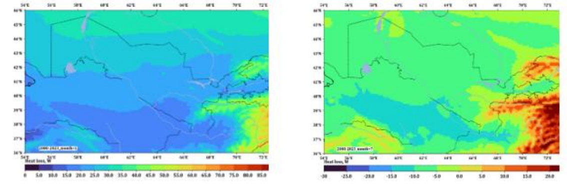


Рис.5. (а, б). Среднечасовые значения теплопотерь за январь (а) и теплопоступления за июль (б) на 1 м² окна в Узбекистане по данным среднечасовых значений температуры за 2000-2023 годы [42].

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

Например, отрицательные значения на тепловой карте (рис. 5б) показывают количество тепла, которое может поступить в помещение через окно при поддержании внутренней температуры на уровне 22°С, что демонстрирует эффективность оконных конструкций в условиях, когда наружная температура выше внутренней. Как видно из рис. 5, в январе средние часовые значения теплопотерь через 1 м² окна варьируются в пределах 20–30 Вт, что при расчёте на месяц (744 ч) составляет 14,88–22,32 кВт·ч. В июле анализ тепловых потоков через окна показал, что в зависимости от зоны теплопоступление составляет от –5 Вт до –15 Вт, что приводит к общему поступлению энергии в диапазоне 3,72–11,16 кВт·ч на 1 м² за месяц. Таким образом, проведённая оценка показывает, что ЭОБ эффективно снижают теплопоступление в летний период, уменьшая нагрузку на системы кондиционирования и снижая энергопотребление.

Продолжая исследования в рассматриваемой области и обобщая их результаты, исследователем М. Дехконовой разработаны методика и алгоритм расчёта, позволяющие вычислять тепловые потери и теплопоступления через трёхслойные ЭОБ при изменении их параметров [44]. Модель учитывает такие параметры, как толщина стеклопакета, ширина воздушной прослойки, степень чёрноты поверхности, а также внутреннюю и внешнюю температуру, что позволяет более точно рассчитать процессы теплообмена.

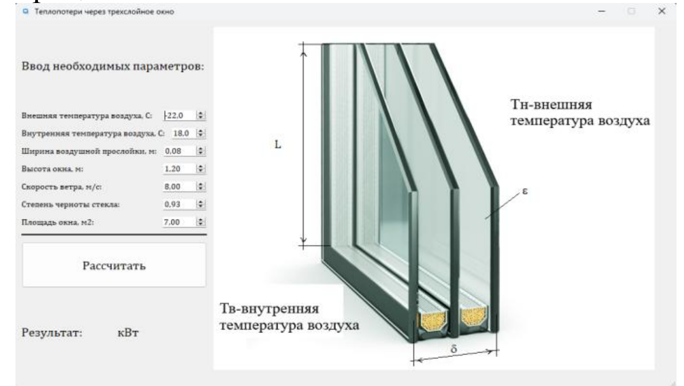


Рис.7. Интерфейс ПО по определению значения тепловых потерь в трехслойных ЭОБ для пассивных зданий [44].

В данной работе, изменяя исходные параметры, можно адаптировать расчёты для различных климатических условий, что делает возможным детализированный анализ как теплопотерь, так и теплопоступлений в конкретном регионе. Предложенная математическая модель является важным **инструментом для оценки эффективности применения ЭОБ** в различных климатических зонах и для повышения энергосбережения в пассивных зданиях.

Далее, с учётом полученных результатов и обобщая практический опыт, Н.Р. Авезова и др. выполнили исследование [45], в котором на основе показателей сухого и влажного термометров, абсолютной влажности воздуха, энтальпии воздуха в помещении и др., а также климатических данных за 2005–2022 гг. (собранных установленными метеостанциями регионов республики с временным шагом 10 мин) предложен подход по **моделированию пассивных зданий с применением цифровой диаграммы Джованни**. Данный подход позволяет составить карту биоклиматических зон регионов республики и тем самым оптимизировать повышение ЭЗ при проектировании зданий с ПССО.

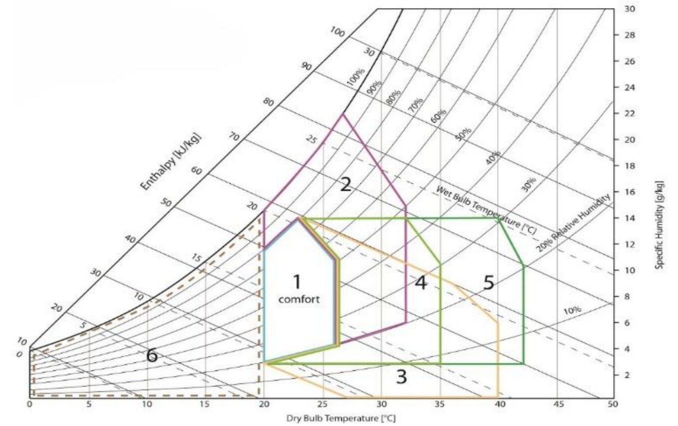


Рис.8. Биоклиматические зоны по диаграмме Джованни [45].

1 – зона комфорта; 2 – зона естественной вентиляции; 3 – зона испарительного охлаждения; 4 – зона высокой тепловой массы; 5 – зона высокой тепловой массы и ночной вентиляции; 6 – зона пассивного отопления.

Как известно, биоклиматическая карта Джованни определяет способ охлаждения или обогрева в зависимости от климатических условий наружного воздуха. В сочетании с климатической базой данных эта диаграмма иллюстрирует значения температуры и влаж-

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

ности в графическом формате, предлагая оптимальные стратегии и демонстрируя улучшение комфортных условий в соответствии с каждой из них. На диаграмме Джованни выделены шесть зон для пассивных проектных стратегий (рис. 7). Климатические показатели, такие как температура окружающей среды и относительная влажность, могут быть нанесены на диаграмму, что позволяет определить, в какую из шести зон попадают указанные условия.

На рис. 9 представлена биоклиматическая карта г. Ташкента, полученная с использованием диаграммы Джованни [45].

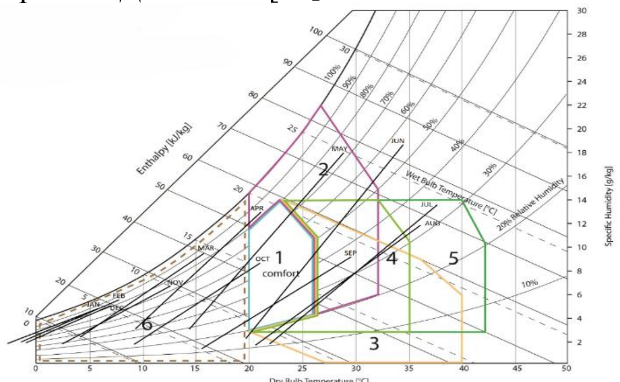


Рис.9. Биоклиматическая карта г. Ташкента [45].

Анализ карт биоклиматических зон для г. Ташкента показывает, что комфортная зона охватывает в основном половину мая и июня, а также сентябрь. В этой зоне температура и относительная влажность находятся в пределах комфортных условий (20–26°C и 20–80% относительной влажности). Для поддержания комфорта достаточно минимальных пассивных стратегий, таких как естественная вентиляция и минимизация теплопотерь. При приближении температуры к 26°C необходимо контролировать поступление СИ, чтобы оно не превышало 300 Вт/м², во избежание избыточного нагрева помещения. СИ может контролироваться с помощью затеняющих устройств, высокоэффективных окон и правильной ориентации здания.

- Естественная вентиляция в Ташкенте возможна с апреля по июнь, когда температура внутри здания превышает комфортные условия (>26 °C), и для обеспечения теплового комфорта требуется интенсивная естественная вентиляция ~50% времени. При этом скорость воздушного потока должна быть в пределах 0,1–0,4 м/с, чтобы эффективно охлаждать внутренние помещения и предотвращать перегрев.

- В июле и августе для климатических условий Ташкента актуальна зона испарительного охлаждения, когда высокие значения температуры (30–40°C) и низкая относительная влажность (<50%) требуют применения испарительного охлаждения, что существенно снижает температуру воздуха, одновременно увеличивая относительную влажность. Необходима хорошая вентиляция для предотвращения накопления водяного пара; скорость воздушного потока должна составлять не менее 0,5 м/с. Испарительное охлаждение применяется 100% времени.

- В сентябре наблюдается зона высокой тепловой массы и ночной вентиляции (температура в пределах 25–35°C, относительная влажность 30–60%), когда требуются материалы с высокой теплоёмкостью (бетон, кирпич, камень) для сглаживания суточных колебаний температуры (на 5–10°C) внутри помещений. Ночная вентиляция необходима для охлаждения строительных материалов в течение ночи, когда температура наружного воздуха снижается, что помогает поддерживать комфортную температуру в течение дня. Тепловая масса и ночная вентиляция применяются ~60% времени.

- Зона охлаждения для Ташкента наблюдается с июня по август, когда температура значительно превышает комфортные условия (>26°C, относительная влажность 40–70%), и для обеспечения теплового комфорта требуется механическое охлаждение около 43% времени. Пассивные методы, такие как затенение и использование высокоэффективных окон, могут дополнять системы кондиционирования воздуха; СИ должно быть снижено до уровня менее 500 Вт/м².

- С декабря по февраль температуры ниже комфортных условий (<20°C, относительная влажность 60–80%), и для поддержания теплового комфорта требуется подключение пассивной системы отопления на 100% времени. Пассивные методы включают использование солнечного отопления, теплоизоляцию и сни-

жение теплопотерь через ограждающие конструкции. Оптимально использовать солнечные коллекторы и тепловые насосы для повышения энергоэффективности. Лишь в немногие дни этого периода требуется подключать активные системы отопления для поддержания комфортной температуры внутри здания.

Предложенная биоклиматическая карта Ташкента (с использованием диаграммы Джованни) позволила выделить оптимальные стратегии для различных сезонов года и оптимизировать конструктивные решения, направленные на снижение энергопотребления и повышение комфорта в жилых и общественных зданиях в системах отопления и охлаждения.

На основе анализа существующих исследований в области ПССО с ЭОБ, включающего критическую оценку признанных результатов зарубежных и отечественных учёных по моделированию теплового режима и опыта проектирования, авторами настоящей работы разработан СНиП «Пассивный хаус», то есть государственный нормативный документ – ШНК 2.08.08.22 «Пассивные здания: жилые», введённый в действие в Республике Узбекистан, в котором учтено применение ПССО и ЭОБ [46].

Таким образом, комплексное применение продуманных стратегий пассивного проектирования, использование корректных исходных данных, углублённое моделирование ПССО и внедрение инновационных элементов, таких как энергоактивные окна, позволяет максимально реализовать потенциал пассивного солнечного отопления. Рассмотренные научные результаты, обобщающие как мировой опыт, так и достижения школы Р. Р. Авезова, обладают высокой научной и практической значимостью. Они не только расширяют фундаментальные представления об энергосберегающих технологиях в архитектуре, но и служат надёжной основой для разработки нормативных требований и рекомендаций по созданию устойчивых энергоэффективных зданий в различных климатических условиях. Такое сочетание теории и практики наглядно демонстрирует ценность научного подхода к проектированию пассивных зданий и подтверждает ведущую роль отечественных исследований в данном направлении.

Выводы. В ходе исследования систематизированы подходы к моделированию ПССО и проанализированы достижения отечественных и зарубежных учёных как в научном, так и в практическом плане, выявлены следующие основные моменты:

- критический анализ результатов исследований в рассматриваемой области показывает, что подход моделирования ПССО с детализированными численными методами обеспечивает наиболее точное моделирование теплопередачи и воздушных потоков. Использование таких методов позволяет снизить погрешность расчётов на 10–15% по сравнению с традиционными подходами. Сочетание численных методов и экспериментальных данных с применением симуляционных инструментов (таких как EnergyPlus и DesignBuilder) обеспечивает оптимизацию конструктивных решений проектируемых зданий.
- для повышения энергоэффективности современных зданий с ПССО необходимо применение ЭОБ, так как они обеспечивают не только естественное освещение и теплоизоляцию, но и аккумулирование солнечной энергии для обогрева помещений. Показано, что нанесение низкоэмиссионных покрытий на окна снижает теплопередачу на 30–50% по сравнению с обычным остеклением; заполнение стеклопакетов инертными газами (аргон, криптон) уменьшает теплопотери на 20–30%; в условиях холодного климата трёхкамерные стеклопакеты с аргоном позволяют сохранить до 22 Вт/м² энергии на каждый квадратный метр остекления.
- стратегии проектирования пассивных зданий основываются на климатических показателях местности, что диктует необходимость подготовки максимально точных исходных данных. Результаты исследований отечественных учёных по моделированию ПССО с учётом климатических условий республики стали основой разработки биоклиматических карт для оценки энергоэффективности зданий в различных регионах страны. Показано, что в условиях Ташкента использование ПССО может снизить энергозатраты на отопление на 30–40%, а применение локальных климатических данных (например, градусо-суток отопительного и охлаждающего периодов) обеспечивает точную

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 2
2025

адаптацию технологий ПССО к региональным условиям.

Таким образом, развитие подходов к разработке и моделированию ПССО с оптимальными параметрами и их адаптация к региональным условиям создают основу для внедрения энергоэффективных технологий, которые способствуют устойчивому развитию строительной отрасли и снижению углеродного следа в республике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. R.R. Avezov, N.R. Avezova, N.A. Matchanov, Sh.I. Suleimanov, R.D. Abdukadirova, History and State of Solar Engineering in Uzbekistan// Applied Solar Energy, 2012, Vol. 48, No. 1, pp. 14–19.
2. Авезов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. Ташкент: Фан, 1988. 288 с.
3. Janssen, H., Blocken, B., & Carmeliet, J. Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007.50, 1128-1140.https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.048.
4. Gerlich, V. Modelling of Heat Transfer in Buildings., 2011 244-248. https://doi.org/10.7148/2011-0244-0248. orientation. Applied Thermal Engineering, 2017. 112, 15-24. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.068.
5. Basok, B.I.; Nakorchevskii, A.I.; Goncharuk, S.M.; Kuzhel, L.N. Experimental Investigations of Heat Transfer Through Multiple Glass Units with Account for the Action of Exterior Factors. J. Eng. Phys. Thermophys. 2017, 90, 88–94.
6. Брызгалин Владислав Викторович, Соловьев Алексей Кириллович Использование пассивных систем солнечного отопления как элемента пассивного дома // Вестник МГСУ. 2018. №4 (115). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-passivnyh-sistem-solnechnogo-otopleniya-kak-elementa-passivnogo-doma.
7. Авезов Р.Р., Бабакулов К.Б. Метод теплотехнического расчета пассивной системы солнечного обогрева (нестационарный режим). -Гелиотехника, 1982, № 5, с.11-18
8. Krivoshein, Y. O., Tolstykh, A. V., Tsvetkov, N. A., & Khutornoy, A. N. Mathematical model for calculating solar radiation on horizontal and inclined surfaces for the conditions of Yakutsk. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 408, 012002. doi:10.1088/1755-1315/408/1/012002
9. Misiopecki, C., Bouquin, M., Gustavsen, A., & Jelle, B. P. Thermal modeling and investigation of the most energy-efficient window position. Energy and Buildings, 2018, 158, 1079–1086. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10
10. Pilipenko, A., & Petrov, S. Computer Simulation and Modelling System of Non-Stationary Heat Exchange Processes. MATEC Web of Conferences, 2018, 155, 01036. doi:10.1051/matecconf/2018155
11. Tian, Z.; Zhang, X.; Jin, X.; Zhou, X.; Shi, X. Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. Energy Build. 2018, 158, 1306–1316.
12. Nguyen A, Reiter S, Rigo P.;1; A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. 2014:1043-58.
13. Crawley, Drury B., et al.;1; «EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program." Energy and buildings 33.4, 2001. 319-331.
14. Hirsch, James “eQUEST”. DOE2. com. http://www. doe2. com/equest, (Accessed 26.05.2016).
15. DesignBuilder. https://www.designbuilder.co.uk. /software/product-overview (Accessed 26.05.2016).

16. Гражданкин А.А., Иванченко В.Т., Письменский А.В. Математическое моделирование теплопередачи через ограждающую конструкцию // Вестник БГТУ имени В. Г. 2020. №6.
17. Зима А. Г. Характеристики окна, влияющие на повышение его теплоизоляционных свойств // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. №3 (33).
18. Cuce E. Riffat S.B. A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. Renew. Sustain. Energy Rev. 2015, 41, 695–714
19. Подковырина К.А., Подковырин В.С. Светопрозрачные ограждающие конструкции (методы снижения тепловых потерь и мировой опыт применения) // Архитектура и дизайн. 2018. № 1. С. 46-51. doi: 10.7256/2585-7789.2018.1.27981
20. Н.Р. Авезова, А.М. Мирзабаев, К.А. Самиев, Н.Н. Далмурадова, М.Х Дехконова. Краткий обзор инженерных подходов по разработке энергоактивых оконных блоков для пассивных зданий// «Проблемы информатики и энергетики» 2024/3 с-228-248
21. Павленко А.М., Садко К. Оценка численных методов прогнозирования энергоэффективности окон// Энергии. 2023; 16(3):1425. https://doi.org/10.3390/en16031425
22. Jean-Michel Dussault, Louis Gosselin, Tigran Galstian. Assessment of building energy efficiency with smart window glazing curtain walls//International Workshop smart materials, structures & NDT in aerospace Conference NDT in Canada 2011. 2 - 4
23. Земцов Виктор Андреевич, Гагарина Елена Владимировна Расчетно-экспериментальный метод определения общего коэффициента пропускания света оконными блоками // Academia. Архитектура и строительство. 2010. №3.
24. Nourozi B, Ploskić A, Chen Y, Ning-Wei Chiu J, Wang Q, Heat transfer model for energy-active windows – An evaluation of efficient reuse of waste heat in buildings, Renewable Energy 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.043
25. Basok, B. I., Davydenko, B. V., Isaev, S. A., Goncharuk, S. M., & Kuzhel', L. N. Numerical Modeling of Heat Transfer Through a Triple-Pane Window. Journal of Engineering Physics and Thermophysics-2016, 89(5), 1277–1283. doi:10.1007/s10891-016-1492-7
26. Kamal A.R. Ismail, Taynara G.S. Lago, Fatima A.M. Lino, Mário Ventura Mondlane, Mavd P.R. Teles, Experimental investigation on ventilated window with reflective film and development of correlations// Solar Energy, Volume 230, Pages 421-434, 2021.
27. Avezov, R.R. Temperature field and heat transfer through partly ray-absorbing translucent enclosure of insolation passive systems for solar heating// Geliotekhnika, (3), pp. 54-57. 2003
28. R. R. Avezov, The influence of heat exchange conditions on the temperature regimes and heat transfer of a partially radiation-absorbing layer of complex transparent enclosures in passive solar heating systems// Geliotekhnika, no. 4, pp. 32-38, 2004.
29. R. R. Avezov and K. A. Samiev, Methodology for calculating the optical characteristics of double- and triple-layer transparent enclosures in passive solar heating// Geliotekhnika, no. 3, pp. 71-78, 2006.
30. Avezova, N.R., Avezov, R.R., Samiev, K.A. Modeling the stationary thermal conditions of a premises heated by a passive insolation system containing a three-layer translucent shield with a partially ray-absorbing film on its inner surface. Applied Solar Energy 2014 50 (1), pp. 30-34.
31. Avezova, N.R., Avezov, R.R., Rashidov, Y.K., Kasimov, F.S. The fuel-replacement factor of insolation passive solar-heating systems with a three-layer translucent shield with a partially ray absorbing transforming film on the inside Applied Solar Energy 2014, 50 (4), pp. 278-281
32. К. А. Самиев. "Повышение эффективности сложных светопрозрачных ограждений с частично лучепоглощающим слоем инсоляционных пассивных систем солнечного отопления" автореферат диссертационная работа. Ташкент – 2010. С-55.
33. Avezova, N.R., Avezov, R.R., Rashidov, Y.K., Samiev, K.A. Model-based analysis of nonstationary thermal mode in premises with an insolation passive heating system with a three-layer translucent shield Applied Solar Energy 2014. 50 (3), pp. 184-187.

34. Avezov, R.R., Samiev, K.A. Effect of the placement of a partially radiation-absorbing layer on the optical and thermotechnical characteristics of a three-layer translucent screen of passive insolation solar-heating systems// Applied Solar Energy 2006. 42 (4), pp. 11-14.
35. Самиев К.А. Математическое моделирование теплового режима инсоляционного пассивного система солнечного отопления с трехслойными вентилируемыми светопрозрачными ограждениями// Гелиотехника. – 2009 №4. С.121-126.
36. Avezov, R.R., Samiev, K.A. Technique for calculation of optical characteristics of two- And three-layer light transmissive screens in insolation passive solar heating systems Applied Solar Energy 2006, 42 (3), pp. 45-49.
37. Самиев К.А. Тепловая эффективность пассивных систем солнечного отопления// автореферат докторская диссертационная работа. Ташкент – 2023. с.56
38. N.R. Avezova, E.Yu Rakhimov, NN Dalmuradova, MB Shermatova. Adjustments to the indicators of the heating and cooling degree-days for regions of the Republic of Uzbekistan// 2-nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering (ICECAE 2021), PP. 278-288.
39. Murat Kenisarin, Kamola Kenisarina. Energy saving potential in the residential sector of Uzbekistan. // Energy 32 (2007) 1319–1325.
40. КМК 2.01.04-97. Пособие по проектированию новых энергосберегающих решений по строительной теплотехнике. Строительная теплотехника. 01.01.2012 г.
41. Н.Р. Авезова, Э.Ю. Рахимов, А.У. Вохидов, М.Х. Дехконова. Методика расчета тепловых потерь через трехслойные светопрозрачные ограждения зданий// международной научно-практической конференции “Подготовка кадров по солнечной энергетике: технологии, методы и инструменты” 20 сентября 2024 года, г. Фергана
42. ERA5-Land hourly data from 1950 to present. https://cds-beta.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=overview
43. Дехконова М.Х.“Программа для определения значения тепловых потерь в трехслойных энергоактивных оконных блоков для пассивных зданий”// ДГУ № 40083.14.06.2024
44. Nilufar Avezova, Akrom Mirzabaev, Ergashali Rakhimov, Nargiza Dalmuradova, Makhliyo Dekhkonova. Passive project strategy: Givoni diagram//Journal of Construction and Engineering Technology JCET: volume 2, issue 2, 2024.
45. ШНК 2.08.08-22. Пассивные здания: жилые. https://mc.uz/uploads/mcuz_999401255275.pdf